

結晶粒微細化防弾鋼板技術の開発

三菱長崎機工株式会社

中村 清明

松添 康夫

吉田 剛

1.はじめに

高速度で飛翔する弾丸等が鋼板に着弾し侵徹、破壊に至る即ち貫通となる現象に対して多種ある鋼板の中で最も薄い板厚で耐弾する鋼板が防弾鋼板と言われているものです。

防弾鋼板は現在までに装備化されている戦闘車両において弊社が耐弾性能の優れた防弾鋼板を開発し、耐弾試験等を経て採用していただいています。

本防弾鋼板は平成 12 年（2000 年）三菱重工業株式会社殿より新型戦車に必要な性能を有する結晶粒微細化防弾鋼板のご要求を受け、開発に着手しました。

小型の射撃試験板から提供を開始し、各種対象脅威に対する射撃試験を重ねながら耐弾性能を向上・安定させつつ装備品に必要な大型寸法の射撃試験板を試作、実大総合試験を経て 10 式戦車またその次に開発された 16 式機動戦闘車に結晶粒微細化防弾鋼板を採用いただきました。



10 式戦車（出典元：陸上自衛隊 HP より引用） 16 式機動戦闘車（出典元：陸上自衛隊 HP より引用）

2.開発の経緯

結晶粒微細化防弾鋼板の社内研究・開発は昭和 58 年から中・高周波誘導加熱による方法を採用しました。

昭和 61～62 年、防衛庁技術研究本部殿（当時）所内研究に結晶粒微細化防弾鋼板を納入し耐弾性能評価試験が行われました。

昭和 63 年、三菱重工業株式会社殿・材料小委員会で昭和 63 年研究試作品を検討し、薄板

から中厚板までの範囲で結晶粒微細化防弾鋼板の製作が決定されました。
 結晶粒微細化防弾鋼板の防衛庁技術研究本部殿における研究はその後も行われ、平成 4 年
 研究試作では薄板から中厚板までの大型寸法の中・高周波誘導加熱処理を実施しました。
 (平成 8 年所内研究まで継続)

先に述べましたように、三菱重工業株式会社殿よりご要求を受けました結晶粒微細化防
 弾鋼板の開発にあたり、静的挙動として材料強靱化の中で結晶粒微細化の役割について検
 討しました。

2.1 強靱化

材料強靱化のための冶金的因子について次の表に示しました。

狙い	求める特性	制御因子	プロセス
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">材料は多結晶体である</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">結晶粒+結晶粒界から成り立つ</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">結晶粒内の強靱化</div> <div style="text-align: center;">↓</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">結晶粒界の強靱化</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">粒内析出物による強化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">粗大析出物の阻止</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">結晶粒界面積の拡大</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">粒界脆化の軽減</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">析出物のサイズ・形態・分布の制御</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">結晶粒の微(超微)細化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">不純物・ガス成分の減少</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">加工+熱処理</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">熱処理</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">精錬</div>

2.2 結晶粒微細化の期待

(1) 結晶粒内析出物の役割

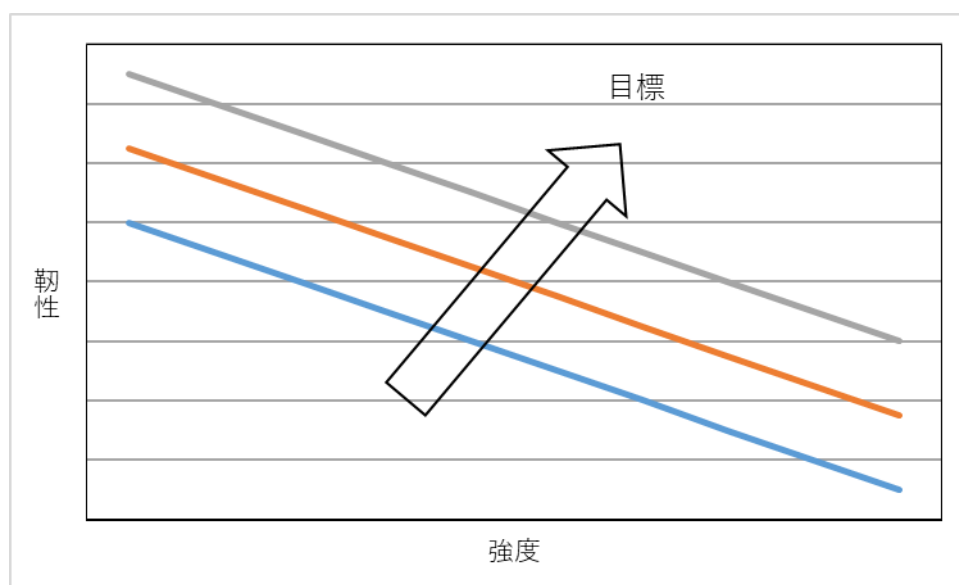
- ・ 転位の運動を妨げる
- ・ 非整合析出物は界面で応力集中を招きやすい(脆化)

(2) 結晶粒界の役割

- ・ 粒界は転位の運動を妨げる

- ・微細粒になるほど結晶粒界面積が大きくなり、同一歪に対する個々の粒界への転位の累積度が小さくなる、つまり応力集中が分散される
- ・粒界面積が大きくなるほど、粒界に偏析する不純元素の濃度を薄められる
- ・特にへき開型の脆性破壊では粒界が亀裂の伝播を阻止する効果がある

全ての対象脅威に対してオールマイティな耐弾材料・防弾鋼板は存在しません。しかしながら、様々な対象脅威の侵徹挙動に対して防弾鋼板の材料特性（強度・靱性）を引き上げる事で、耐弾性能向上の可能性を潜在的に所有し続けられたらと考えました。



これらを踏まえて、中・高周波誘導加熱技術を確立する事で

- ①可能な限り結晶粒を微細化する
 - ②整粒化に努める
 - ③全域マルテンサイト化する（非析出型変態であり、格子欠陥が均一に分布）
 - ④焼入時の割れを防止する
 - ⑤装備品に対応可能な大型寸法の結晶粒微細化防弾鋼板を製作する
 - ⑥中・高周波誘導加熱に関する特許を取得する
- を目標として開発を進めました。

3.中・高周波誘導加熱の取り組みと成果

鋼板への誘導加熱は一般的に高周波を使用し、鋼板の表裏面に対して比較的浅い深さまでの加熱を行い、焼入により表面硬化・耐摩耗性向上を目的とした技術です。

それに対して防弾鋼板の中・高周波誘導加熱は防弾鋼板の板厚中心部まで加熱し焼入により板厚全域をマルテンサイト化する処理となります。

防弾鋼板の板厚は様々存在しますが、その板厚に対して板厚中心部までを適正な温度まで加熱するためには適正な周波数が必要となります。

また、加熱は銅製コイルをループ状に防弾鋼板に設置し防弾鋼板または加熱コイルを一定の速度で移動させながら加熱と冷却を同時に連続的に行う事により焼入を行います。

加熱領域が防弾鋼板の中で移動しますので、その速度により適正な加熱温度を保持するために大きな出力が必要となります。

①結晶粒微細化

常温から焼入に必要とする適正温度までの加熱、その後冷却し常温に達するまでを非常に短時間で終える事で、急速加熱により結晶粒が再結晶化する前に一機に急速冷却する事で結晶粒が細分化し微細化される事になります。

急速加熱・急速冷却の際の加熱速度・冷却速度や加熱温度、加熱回数により結晶粒微細化の傾向に違いが生じます。

②整粒化

中・高周波誘導加熱処理時の整粒化に必要な条件は加熱コイルと防弾鋼板のクリアランス保持です。

決まったクリアランスを保持出来ない場合は、防弾鋼板表裏面の加熱温度が異なり結晶粒が整粒化されにくくなります。

クリアランスが保持出来ない原因としては、防弾鋼板の急速加熱による熱応力による変形と焼入時における変態応力による変形が発生しますので、変形防止が重要となります。

③全域マルテンサイト化

防弾鋼板全域にわたり、結晶粒微細化しながら焼入を行います。

先に述べましたように適正な加熱温度管理及び最適な冷却方法により加熱及び冷却ムラを防止します。

④焼入時の割れ防止

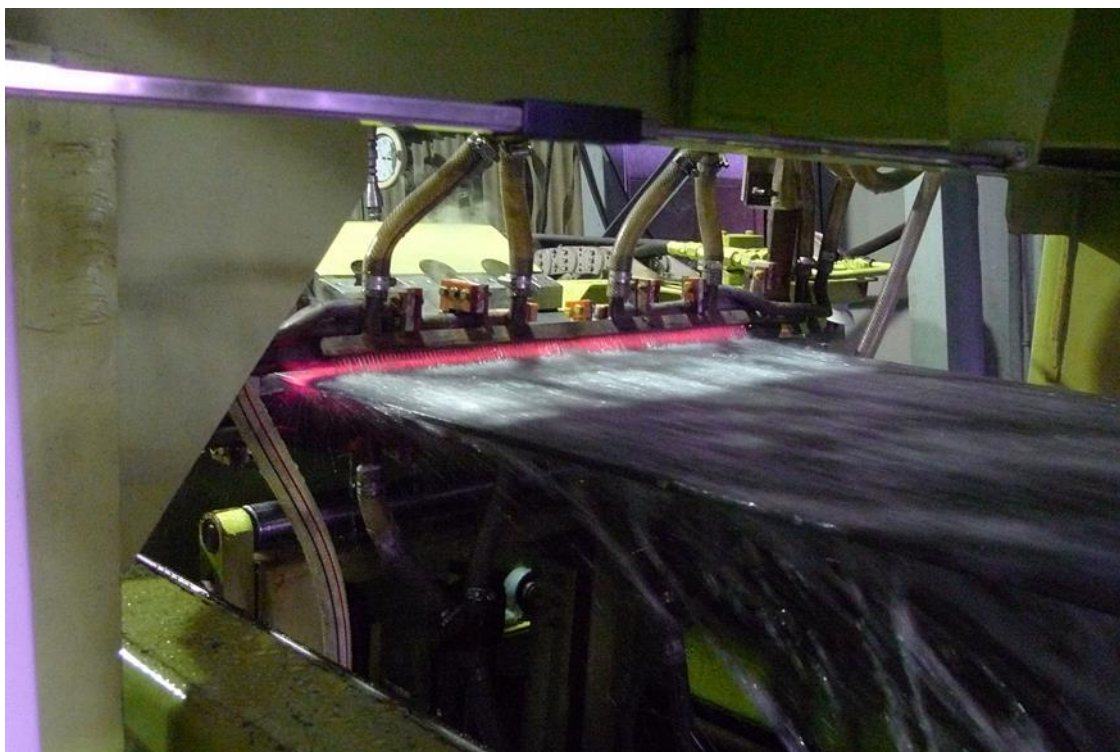
焼入時の割れ発生のほとんどが加熱時では無く冷却時に発生しています。

一定以上の冷却速度により割れが発生するメカニズムを確認しましたが、焼入（マルテンサイト）を得るためには必要な冷却速度がありますので、冷却用液体の選定が重要となります。

⑤装備品に対応可能な大型寸法の結晶粒微細化防弾鋼板

開発当初は射撃試験板 300mm 角が採取出来る寸法から始まり、現在は幅 1m 以上、

長さ 3m 以上の中・高周波誘導加熱処理が可能となりました。



高周波誘導加熱処理

⑥中・高周波誘導加熱に関する特許

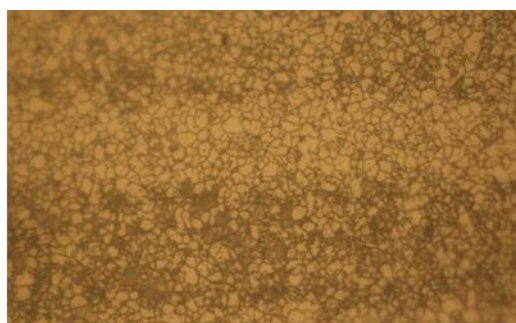
結晶粒微細化防弾鋼板の製造に必要とする中・高周波誘導加熱装置の特許を取得しました。

装置特許を基本とし、結晶粒微細化防弾鋼板を更に大型化・高性能化且つ処理板厚の拡大を図れるよう検討しています。

結晶粒の微細化傾向も開発を進めていく毎に超微細になり、強加工を伴わない熱処理のみで、結晶粒を従来以上に微細化することが出来るようになりました。



通常熱処理・結晶粒



中・高周波誘導加熱・結晶粒

4.おわりに

この度、防衛基盤整備協会賞という栄誉をいただき、たいへん光栄に存じます。
今後も更なる研究・開発を続け、ご期待に応えられますよう尽力して参る所存です。

本開発におきましては、防衛省殿、防衛装備庁殿、三菱重工業株式会社殿をはじめとする
多くの関係者の方々より多大なるご指導とご鞭撻をいただきましたことを深く感謝申し
上げます。

以上